

ANÁLISE DE TENSÕES EM TRILHO FERROVIÁRIO

Eliane D. Alvarez

Lenira K. Guimarães

Liane Roldo

Telmo R. Strohaecker

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia
Av. Osvaldo Aranha, 99 – Sala 610
90035-190 Porto Alegre, RS

***Resumo.** Este trabalho tem como objetivo analisar tensões em trilho ferroviário do tipo TR68 (normalmente empregado em ferrovias com altas cargas, como por exemplo minérios de ferro). Foram empregadas técnicas experimentais de fotoelasticidade, análise de tensões residuais através do método do furo e modelamento por elementos finitos. Devido a diferenças geométricas entre rodas e trilhos e ao próprio movimento lateral do veículo sobre os trilhos, cada roda passa sobre o trilho em posições longitudinais diferentes. Portanto, o contato não é distribuído igualmente sobre o boleto do trilho acarretando diferentes níveis de deformações e, conseqüentemente, diferentes níveis de tensões residuais sobre a seção do trilho, o que pode acarretar o colapso do componente em serviço. Os resultados obtidos descrevem qualitativamente as tensões na região de contato do boleto do trilho com a roda.*

***Palavras-chave:** Tensões, Trilhos, Fotoelasticidade, Método do furo, Elementos finitos.*

1. INTRODUÇÃO

Os trilhos ferroviários são componentes susceptíveis a altos níveis de tensões decorrentes da pressão de contato cíclica imposta pela carga vertical distribuída entre as rodas. Também estão sujeitos a efeitos tais como temperatura, processo de fabricação, assentamento da via, esforço de flexão, etc. que quando combinados podem agravar o nível de tensões principalmente na região do boleto, levando o componente ao colapso.

Durante a manufatura do trilho são introduzidas tensões compressivas denominadas tensões residuais iniciais. Estas tensões são modificadas em serviço devido ao efeito da pressão de contato. Como este contato ocorre no boleto do trilho, a maioria das falhas surgem nesta região. Esta região de contato é função do perfil do boleto e do ângulo relativo entre o ângulo de assentamento do trilho e o de usinagem da pista de rolamento da roda. A variação da inclinação do trilho resultará em novas regiões de contato e conseqüentemente de novas distribuições de tensões no boleto.

As tensões no interior do trilho, decorrentes do contato sob carga vertical, são tensões de flexão e tensões adicionais de contato. Segundo Griffin (1992), as cargas de tráfego atingem elevados valores, donde resultará o escoamento do material que se deforma plasticamente na

camada superficial do boleto e a região logo abaixo permanece no regime elástico. Essa região elástica atua como uma mola sobre a superfície plastificada tentando fazer a camada superior retornar à sua forma inicial gerando tensões compressivas na superfície. Entretanto, como o equilíbrio deve ser mantido, existirão tensões residuais trativas no restante do boleto.

Com a intenção de obter a distribuição de tensões no boleto do trilho em função da região de contato e do tempo de uso, foram utilizadas três técnicas de análise. Sendo estas fotoelasticidade, método do furo e simulação por elementos finitos.

2. MATERIAL E PROCEDIMENTOS

Para a realização deste trabalho foram utilizadas três técnicas de análise: fotoelasticidade, método do furo e simulação por elementos finitos. A análise de tensões foi realizada em trilho do tipo TR68 sem uso e com oito anos de serviço.

2.1 Tensões na região de contato em função da inclinação do trilho empregando fotoelasticidade

Utilizando a fotoelasticidade plana foi possível analisar qualitativamente as tensões na seção transversal do boleto em função da inclinação do trilho.

A partir da Fig. 1 (a) é possível verificar que o trilho quando é assentado na via apresenta um determinado ângulo de inclinação representado por θ . Neste experimento foram analisadas as tensões para as seguintes inclinações do trilho: zero, 1:40, 1:28, e 1:15. A roda foi mantida fixa durante o experimento, com inclinação dada pelo ângulo de usinagem.

Para a realização das medidas foram confeccionados dois perfis da seção transversal do boleto do trilho, um sem uso (novo) e outro com oito anos de serviço (velho) e um perfil de uma roda de 38". O material fotoelástico utilizado foi o PSM-1 que corresponde a uma placa de material Policarbonato, excelente para modelamento bidimensional.

Na Fig. 1 (b) é apresentado a forma de carregamento, simulando a situação de contato roda-trilho.

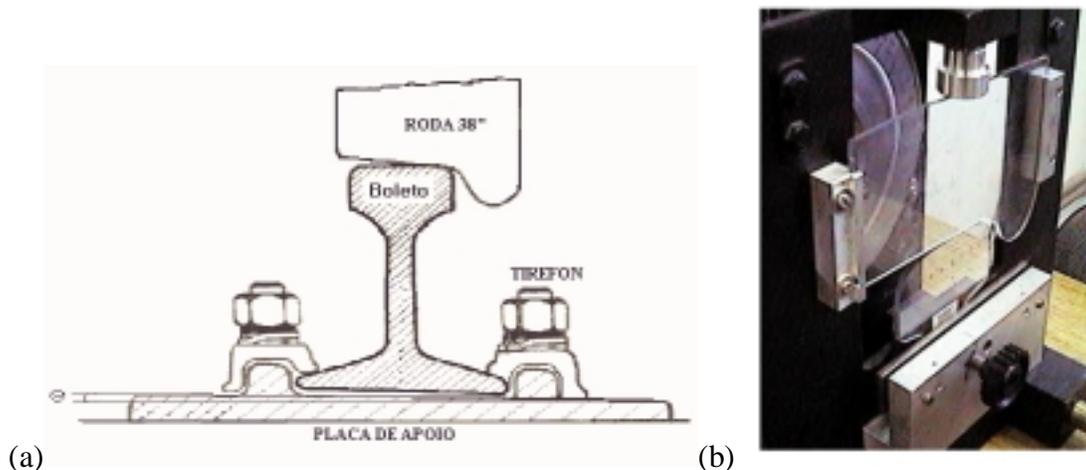


Figura 1 - Contato roda-trilho. (a) Representação esquemática da inclinação do trilho. (b) Modelos fotoelásticos no sistema de carga simulando contato.

Os pontos analisados no boleto do trilho foram obtidos no ponto central de contato nas seguintes profundidades: 4mm, 8mm, 12mm e 16mm.

Durante a realização das medidas foram utilizados um Polariscópio de Transmissão para a visualização das franjas e um compensador para determinar as ordens das franjas nos pontos a serem analisados.

2.2 Método do furo

O Método do Furo, normalizado pela norma ASTM-E837/89, foi utilizado para medir as tensões residuais e o ponto de inversão destas no plano perpendicular ao furo. Broek (1989) aponta para uma zona de inversão de tensões residuais de compressivas para trativas, abaixo da superfície, que explicaria a nucleação de trincas naquela região do boleto.

Realizou-se seis medições de tensões residuais no boleto de um segmento de trilho com 600 mm de comprimento. Os ensaios foram realizados na região central deste. Foram realizadas medições na superfície, a 6mm e a 8mm de profundidade. Foi utilizado o método de eletroerosão para retirada de parte da camada superficial do boleto para as medições abaixo da superfície original (Fig. 2).

As deformações relaxadas no trilho foram medidas incrementalmente e as tensões residuais foram calculadas através do Método da Integral que, segundo Schajer (1988), aborda as tensões residuais como sendo não-uniformes. A roseta modelo EA-06-062RE-120 da MicroMeasurements foi utilizada para a medição das tensões residuais.

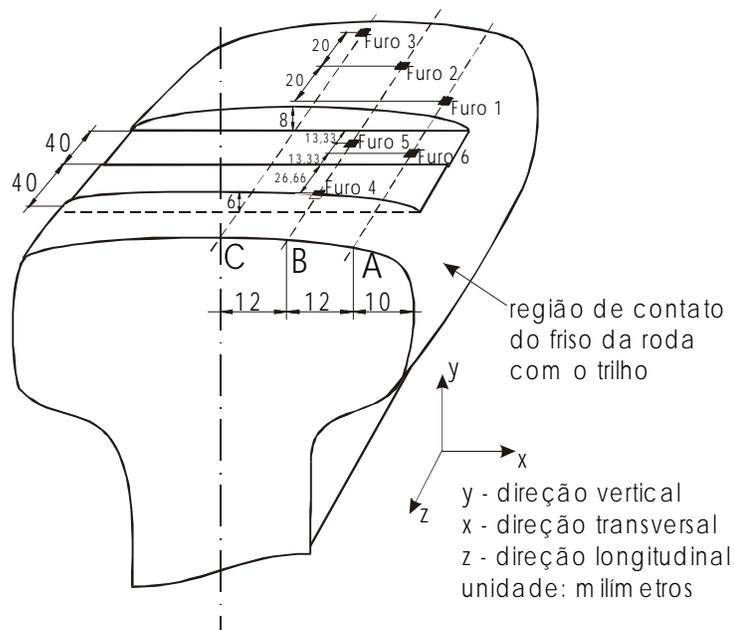


Figura 2 – Desenho esquemático que mostra a posição e a região, no boleto, onde os ensaios foram realizados.

2.3 Cálculo de tensões no trilho por elementos finitos

Utilizando análise linear de tensões com o método de elementos finitos, buscou-se identificar a ocorrência de tensões trativas na região subsuperficial do boleto e ainda verificar quanto à posição em que elas ocorrem.

Apresenta-se aqui dois modelos calculados variando quanto à posição do carregamento. Um modelo tem carga centrada e outro deslocada 12 mm do centro geométrico do trilho. O trilho modelado foi do tipo TR68 na condição sem desgaste (trilho novo) e considerada a

condição de carga transmitida pela roda de 15tn. A carga foi aplicada na forma de pressão e a área de aplicação foi estimada empregando a teoria de Hertz. O modelo gerado compreendeu a metade da distância entre dormentes (270 mm) utilizando condições de simetria e considerando a posição da carga na distância média entre dormentes. Nos cálculos foi empregado o módulo linear elástico de análise de tensões do *software* Algor Inc. A Fig. 3, a seguir, apresenta o modelo empregado.

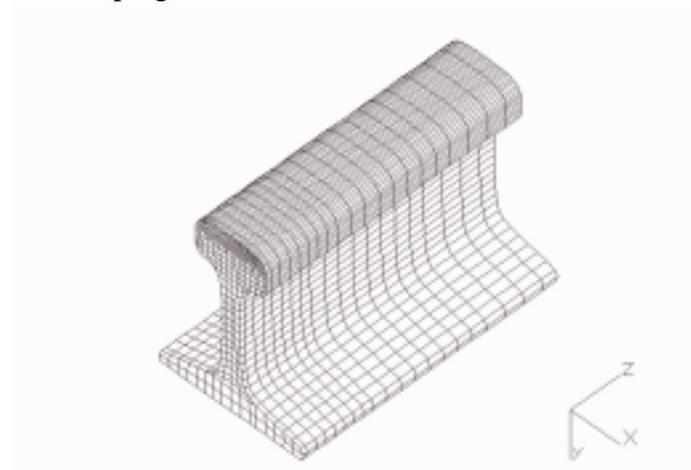


Figura 3 – Modelo empregado para o cálculo de tensões por elementos finitos.

3 RESULTADOS

Os resultados obtidos na análise de tensões no componente são apresentados a seguir.

3.1 Resultados empregando fotoelasticidade

A Fig. 4 fornece as médias das ordens das franjas em função da profundidade (medida a partir da região de contato), para o caso do boleto do trilho sem uso (a) e do boleto do trilho com oito anos de uso (b) para cada inclinação analisada.

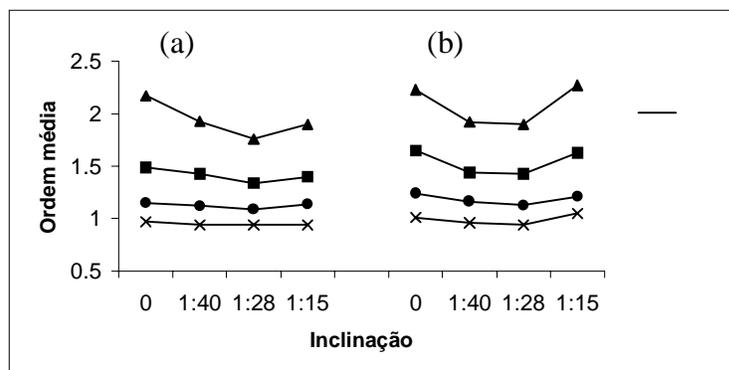


Figura 4 - Ordem médias das franjas para cada inclinação (a) para o trilho novo e (b) para o trilho velho.

A Fig. 5 apresenta o padrão das franjas no boleto do trilho sem uso, na região de contato com a roda, para as inclinação de 1:40 (a) e 1:28 (b). A Fig.6 apresenta o padrão de franjas para o caso do trilho com oito anos de serviço, para as inclinações 1:40 (a) e 1:28 (b).

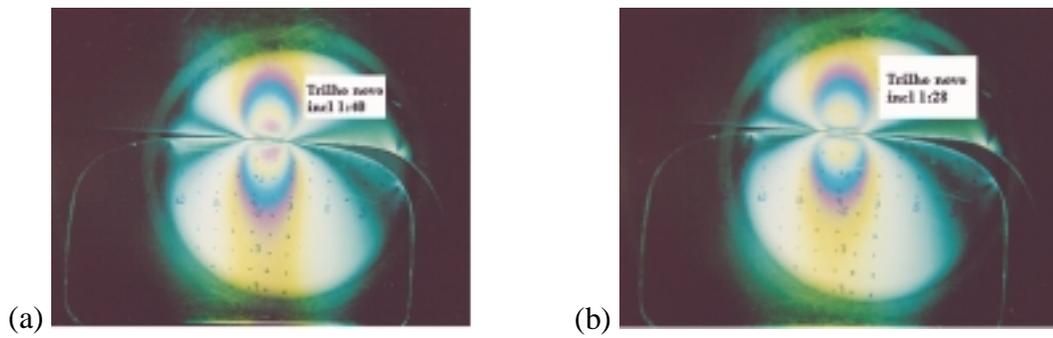


Figura 5 - Modelos fotoelásticos simulando contato roda-trilho, com inclinação 1:40 e 1:28 para o caso do trilho sem uso.

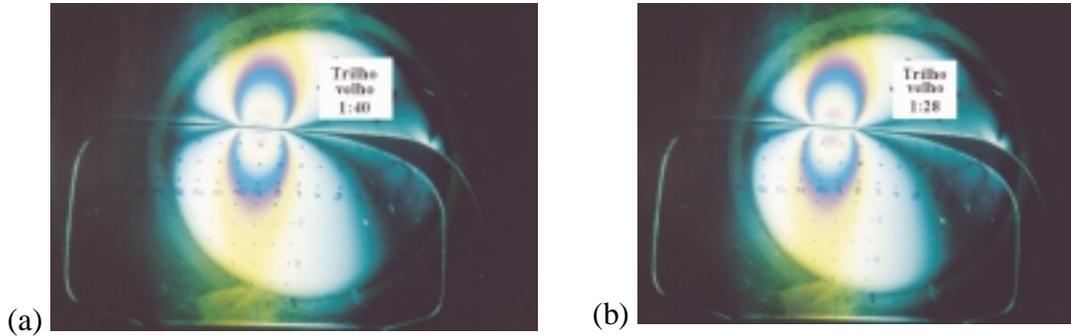


Figura 6 - Modelos fotoelásticos simulando contato roda-trilho, com inclinação 1:40 e 1:28 para o caso do trilho com oito anos de uso.

3.2 Resultados empregando método do furo

A Fig. 7 apresenta o perfil das tensões residuais máximas e mínimas obtidas no plano perpendicular ao furo. A localização destes, no boleto, está descrita na Fig. 2.

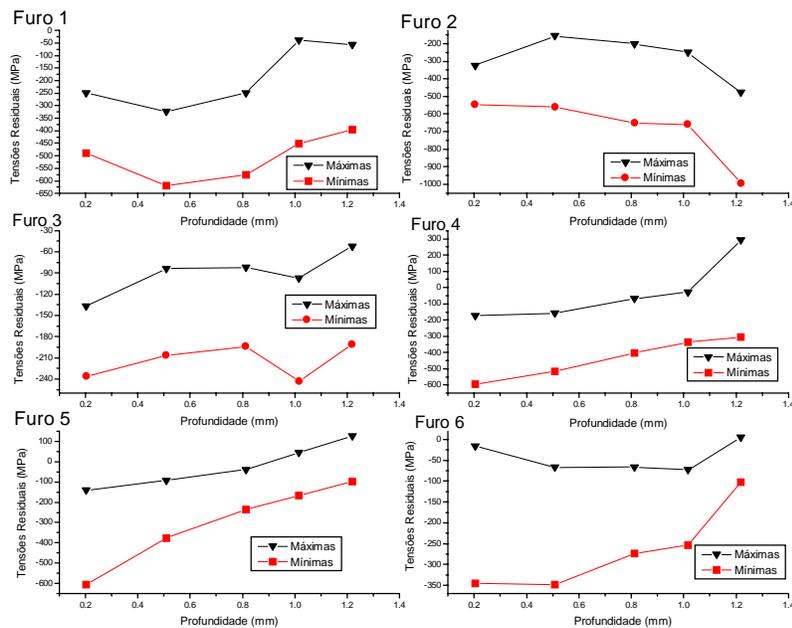


Figura 7 - Tensões residuais principais máximas e mínimas relativas aos 6 furos.

Os ângulos formados entre a tensão principal máxima ($\sigma_{\text{máx}}$) e a direção 1 da roseta (direção longitudinal do trilho) estão representados na Fig. 8(a). Já a Fig. 8(b) mostra a representação das direções (1, 2 e 3) de cada extensômetro de resistência elétrica que compõe a roseta bem como a convenção de sinais dos ângulos ($+\beta$ e $-\beta$).

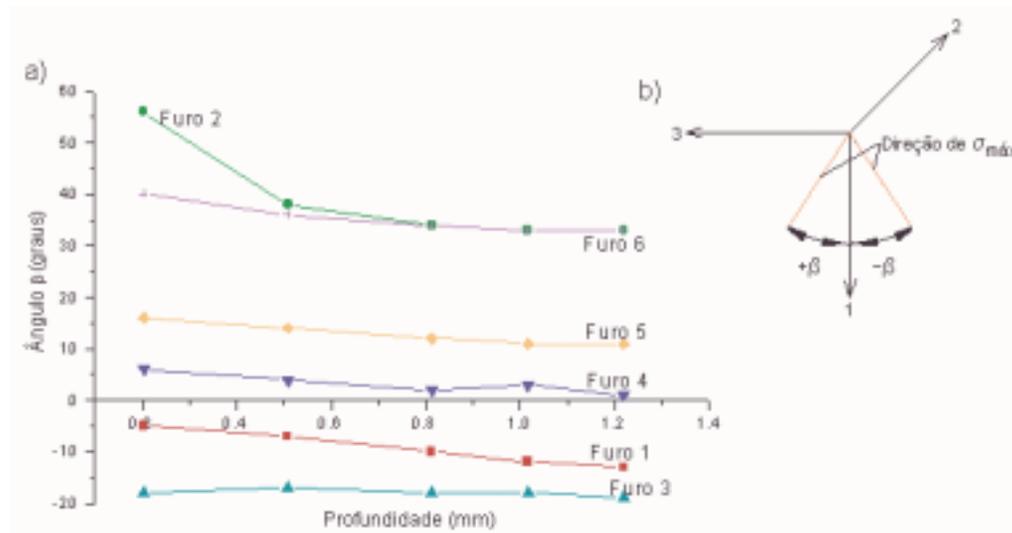


Figura 8 – (a) Ângulos formados entre a tensão principal máxima e a direção 1 da roseta (longitudinal do trilho) e b) Representação das direções (1, 2 e 3) de cada extensômetro e a convenção de sinais dos ângulos.

3.3 Resultados empregando elementos finitos

As figuras a seguir apresentam as tensões pelo critério de von Mises para os modelos com carga centrada e deslocada do centro geométrico do trilho de 12 mm.

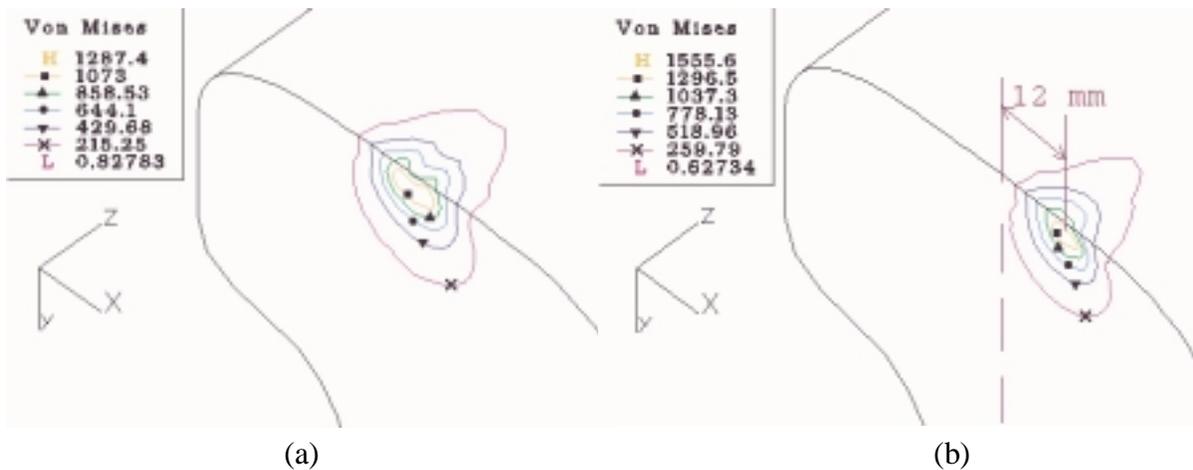


Fig.9 – (a) Tensões pelo critério de von Mises (N/mm²) - carga centrada e (b) Tensões pelo critério de von Mises (N/mm²) – carga deslocada

As figuras a seguir apresentam as tensões nas várias direções e seus respectivos mapas de deformação indicando regiões tratativas abaixo da superfície para o modelo com carga centrada.

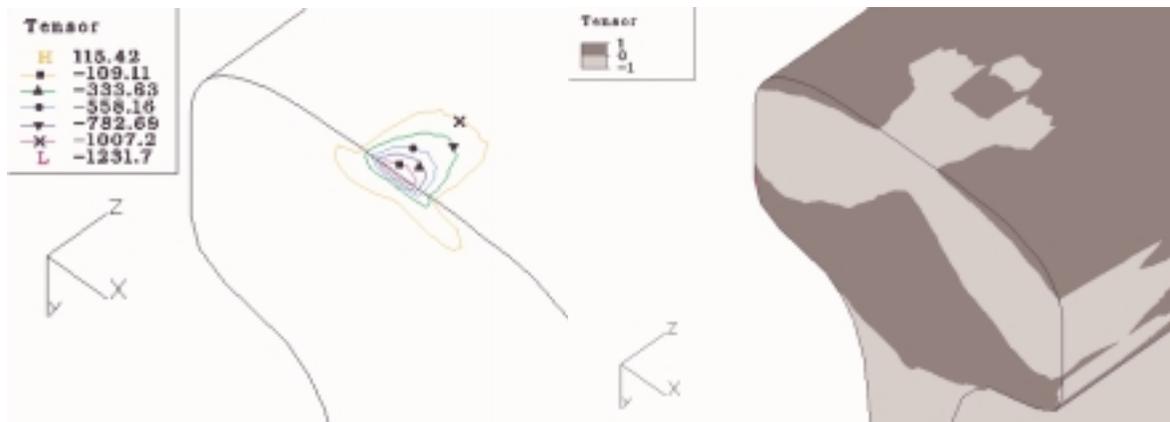


Figura 10 - Tensões na direção X (N/mm²) e visualização das regiões com deformação positiva (tração) e negativa (compressão)

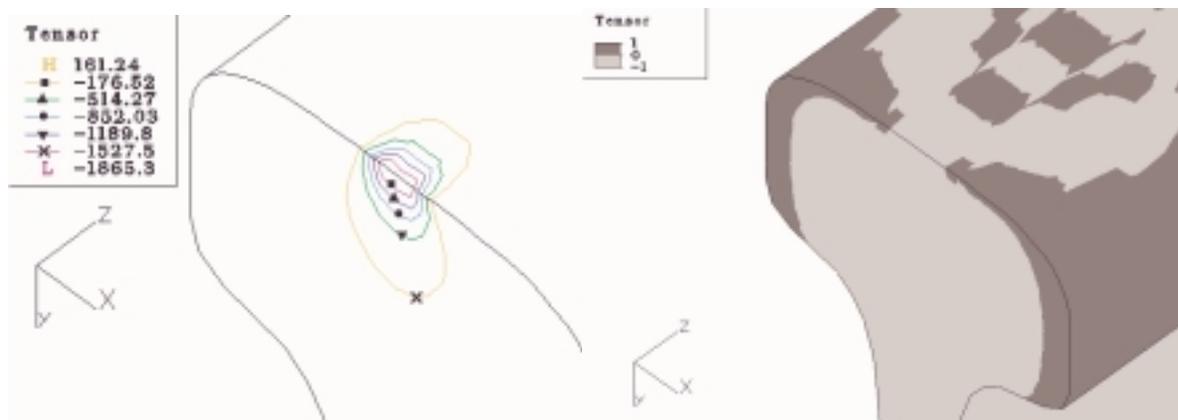


Figura 11 - Tensões na direção Y (N/mm²) e visualização das regiões com deformação positiva (tração) e negativa (compressão)

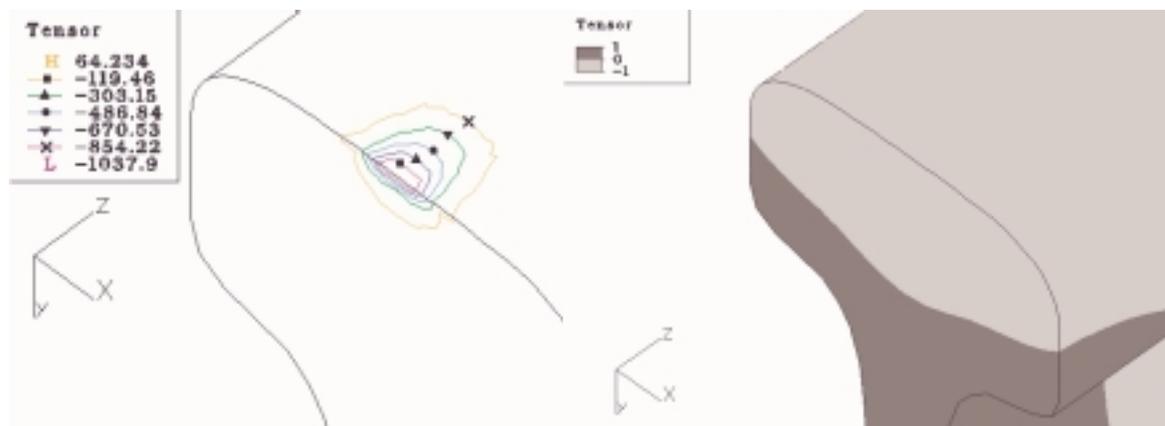


Figura 12 - Tensões na direção Z (N/mm²) e visualização das regiões com deformação positiva (tração) e negativa (compressão)

4. DISCUSSÃO

A partir dos resultados obtidos pode-se observar que os valores das tensões excedem ao limite de escoamento, que é da ordem de 800 MPa, como apresentado na Fig. 9. A análise aqui realizada restringiu-se à uma análise linear elástica de tensões, não prevendo plastificação. Logo, os valores de tensões obtidos nos cálculos são um indicativo de que haverá deformação permanente.

Pode-se observar que o valor máximo de tensão ocorre abaixo da superfície, como pode ser observado na Fig. 7 e 9. Na Fig. 5 e 6 este resultado é apresentado de forma qualitativa. Para este caso, a tensão cisalhante máxima ocorre na região de nucleação das franjas, que corresponde a uma profundidade de aproximadamente 3mm.

A variação da inclinação do trilho modifica a região de contato do boleto com a roda, como pode ser visualizado na Fig. 5 e 6. Os resultados apresentados na Fig. 4 (a) e (b) demonstram que as menores tensões acontecem para a inclinação de 1:28 para o caso do trilho sem uso. No caso do trilho com oito anos de serviço as menores tensões são obtidas tanto para a inclinação de 1:40 quanto para a de 1:28, pois de acordo com Alvarez (1998) as diferenças encontradas neste caso não são significativas. Os resultados apresentados na Fig. 4 demonstram que a partir de 12mm de profundidade as tensões de contato não são função da variação da inclinação.

A condição que acarreta menores tensões corresponde a simulação de carga centrada. Este resultado pode ser comprovado a partir da Fig. 9 (a) e (b).

Pode-se verificar a partir das Fig. 7, 10, 11 e 12, que regiões trativas ocorrem abaixo da superfície, onde há a inversão de tensões que passam de compressivas para trativas. Segundo a Fig. 7 a região de inversão de tensões estaria por volta dos 9mm de profundidade (direção vertical, Fig. 2) no caso do trilho de oito anos de serviço.

A Fig. 8 descreve a direção da tensão principal máxima para as posições medidas (Fig. 2). Neste caso pode-se verificar que a tendência geral corresponde a $\pm 20^\circ$ em relação à direção longitudinal.

5. CONCLUSÕES

A partir das análises realizadas nos trilhos observa-se que:

- As maiores tensões, devido ao contato, encontram-se abaixo da superfície.
- A condição de aplicação de carga centrada tende a minimizar estas tensões.
- Sub superficialmente ocorre a inversão de tensões, de compressivas à trativas justamente na região de nucleação das trincas.
- A partir destes resultados é possível otimizar o perfil do boleto do trilho, uma vez que pode-se avaliar a região de maior concentração de tensões e sua relação com o carregamento aplicado.

Agradecimentos

Ao CNPq, CAPES e FAPERGS pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

Alvarez, D. E. Análise de tensões em trilhos ferroviários empregando fotoelasticidade. Porto Alegre, 1998. 85p. Dissertação de Mestrado em Engenharia (Ciência dos materiais) – Programa de Pós – Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais, UFRGS.

American Society for Testing Materials - ASTM E 837-89., 1989, Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method, Livro anual de normas da ASTM, vols. 03.01 e 12.02.

Broek, D., 1989, The Practical Use of Fracture Mechanics. Kluwer Academic Publishers.

Griffin, K., 1992, Surface Residual Stresses for Rail Steels and Flash-Butt, Rail Steels Symposium Proceedings, pp. 93-107.

Schajer, G.S. Measurement of Non-uniform Residual Stresses Using the Hole-Drilling Method. Part II – Stress Calculation Procedures. Journal of Engineering Materials and Technology, october 1988, vol. 110 p. 338 – 343.

TITLE.

STRESSES ANALYSIS IN RAIL

***Abstract.** The purpose of this work is concerning stresses analysis in railway, type TR68. The experimental techniques used to obtain results are: fotoelasticity, hole-drilling method of residual stresses analysis and finite element modelling. Because of geometrical differences between wheels and rails and side movement of the vehicle against railways, every vehicle is passing with different longitudinal position on railway. Therefore, the contact forces are not distributed equally on the head of the rail, thus the different levels of deformations are produced on the head, and consequently different levels of residual stresses which can cause collapse of used components. Obtained results are qualitatively describing stresses of the contact region between railhead and the wheel.*

***Key words:** Stresses, Rails, Fotoelasticity, Hole-drilling method, Finite elements*